第47卷 第2期
2024年2月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 47 No. 2
Feb. 2024

基于基线遥感生态指数的鄂尔多斯市生态质量分析

薛华柱[1]， 袁 茜[1]， 董国涛[1,2,3]， 姚 楠[1]， 张 晴[1]

（1. 河南理工大学测绘与国土信息工程学院，河南 焦作 454000；2. 黑河水资源与生态保护研究中心，甘肃 兰州 730030；3. 黄河水利委员会黄河水利科学研究院，河南 郑州 450003）

摘 要：鄂尔多斯市是黄河流域重要的草原荒漠过渡带和农牧交错带，研究其生态质量变化对支持黄河流域生态保护和高质量发展具有重要意义。以MODIS遥感影像为数据源，通过改进常规归一化及主成分方法，计算鄂尔多斯市基线遥感生态指数（Baseline remote sensing ecological index，B_RSEI），分析该区域2001—2019年的生态质量时空变化特征。结果表明：（1）B_RSEI具有稳定的方向性和整体性，能更好地反映生态质量长时序变化，2001—2019年鄂尔多斯市B_RSEI呈现起伏增长和东高西低的空间分异性。（2）地表含水量指数是促进B_RSEI的主要因素，是解释B_RSEI分布的主要单因子，地表温度是抑制B_RSEI的主要因素，其交互作用最大。（3）鄂尔多斯生态质量以改善为主，占总面积的67.13%，准格尔旗、康巴什区、伊金霍洛旗地区生态治理效果显著。研究表明鄂尔多斯市生态质量整体改善，B_RSEI有利于分析生态质量年际变化，为鄂尔多斯市生态治理和黄河流域高质量发展提供参考依据。

关 键 词：生态质量；基线遥感生态指数；主成分分析；鄂尔多斯市

文章编号：1000－6060(2024)02－0248－12(0248～0259)

生态质量是生态环境优劣程度的表现，关系到社会经济的发展[1]，良好的生态质量是人类生存和发展的前提。遥感具有采集范围广、周期短、数据获取方便等优点，传统遥感处理平台难以满足遥感大数据的快速处理和信息挖掘[2]，谷歌地球引擎（Google earth engine，GEE）遥感云平台为用户提供了丰富的地理空间数据处理和分析工具[3]，提升了影像处理效率，减少了长时序和大范围监测的工作量，成为生态质量研究的热点[4-6]。通过GEE遥感云平台获取遥感影像对生态质量进行分析，研究其演变特征并分析其驱动机制，对区域可持续发展有着重要意义。

影响生态质量因素较多，需采用多个指标来评价生态质量变化。在国内外现有的遥感生态质量监测方法中，基于绿度、湿度、干度、温度的遥感生态指数（Remote sensing ecological index，RSEI）[7]通过多指标综合进行数据建模，对生态质量的空间分布和演变趋势进行定量描述，已应用于不同区域的生态环境研究[8-10]。随着RSEI探究的深入，有学者对其进行了改进，提升了RSEI的应用价值和普遍性，如：宋美杰等[11]根据主成分的累计贡献率构建改进遥感生态指数，提升生态指标的信息利用率；罗镕基等[12]引入荒漠化指数，从多方面分析生态质量影响因素；Zheng等[13]使用均值标准化对RSEI存在的不稳定性进行改进；Zhu等[14]提出了基于移动窗口的遥感生态指数，探究了生态环境的渐变信息。以上构建的RSEI更适合研究年内生态质量的空间分布，忽视了多年数据间的对比与主成分分析坐标的不稳定性，不利于分析生态质量在时间维度上的动态变化，未解决RSEI在长时序研究中的连续性问题。

生态评价多是通过历史数据的对比参照或者是某一固定模型，进而对生态变化趋势进行分析[15-16]，Cong等[15]依次比较相邻2 a的环境状态，进而研究干旱区生态质量的长时序变化；Wang等[16]将研究期

收稿日期：2023-04-13； **修订日期：**2023-07-15
基金项目：国家自然科学基金(51779099)；国家重点研发计划项目(2016YFC0402400)；河南省科技攻关项目(232102320247)资助
作者简介：薛华柱(1977-)，男，副教授，主要从事地表参数定量遥感反演等方面的研究. E-mail: xhz@hpu.edu.cn
通讯作者：董国涛(1982-)，男，正高级工程师，主要从事水文水资源遥感等方面的研究. E-mail: dongguotao@hhglj.yrcc.gov.cn

内像素级数据的最值作为上下基线对指标进行标准化，基于历史基线的生态质量指数评估中国陆地生态系统生态质量变化。该文基于基线思想提出基线遥感生态指数（Baseline remote sensing ecological index，B_RSEI），将多年遥感信息数据进行整合，遍历数据时间和空间维度，确定最值并建立基线模型，选择主成分分析方法进行一次全局信息降维，将长时间序列的信息转换到同一坐标系中，使得数据分析具有相同的参考点，该方法不但能够直观评估生态质量的空间分布，且更精确地分析区域长时序生态质量变化。

鄂尔多斯市处于黄河"几"字弯处，衔接黄河流域的中游与上游区域，是黄河泥沙的主要来源地之一，在黄河流域中占据重要地理位置，鄂尔多斯市生态质量的研究有助于黄河流域生态保护和高质量发展。本研究利用GEE云平台处理遥感数据的优势，通过B_RSEI模型分析2001—2019年鄂尔多斯市生态质量变化，揭示生态质量的影响因素，以期为鄂尔多斯市的生态治理提供明确方向，为黄河流域的高质量发展提供参考依据。

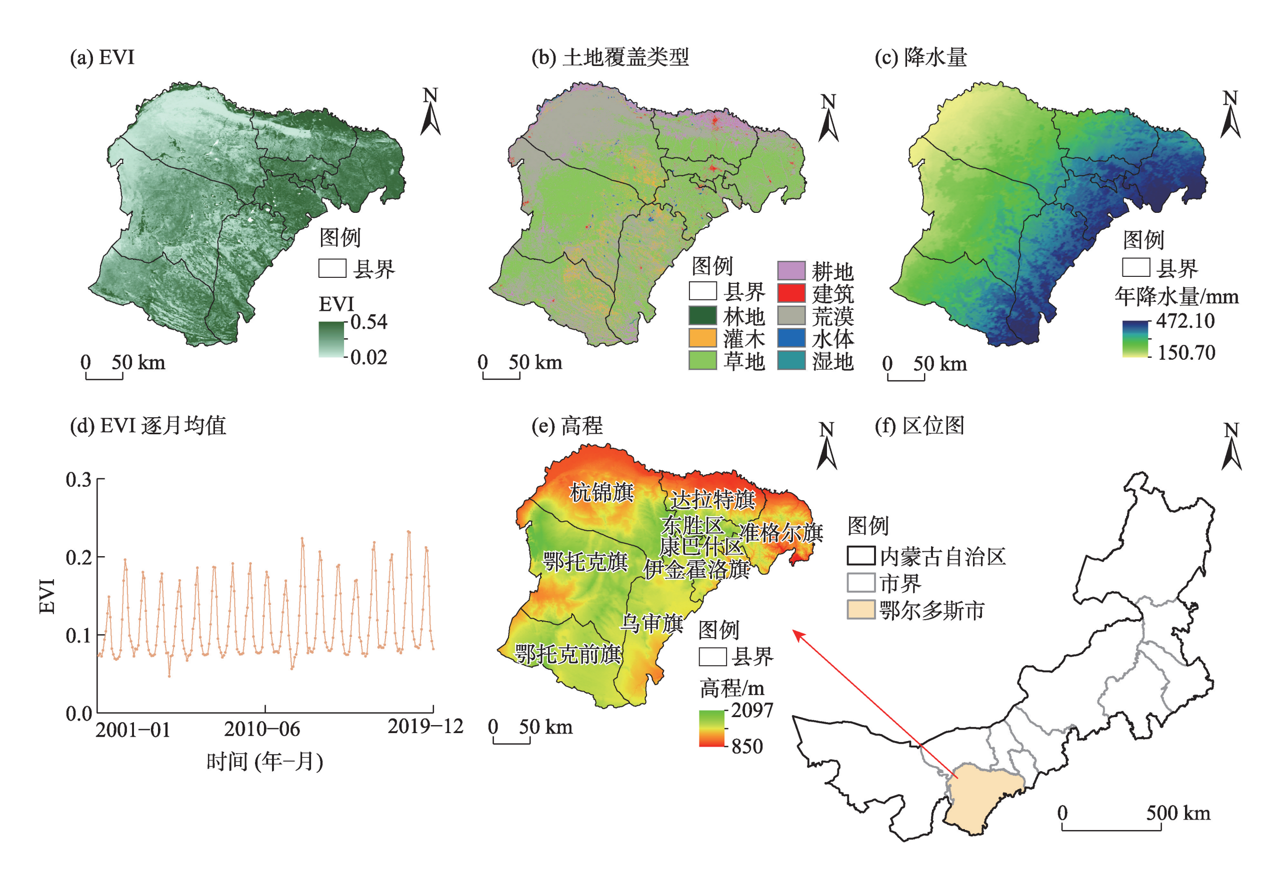
1 研究区概况

鄂尔多斯市位于内蒙古自治区的中西部，海拔850~2097 m，东西长约400 km，南北宽约340 km，含有高原、丘陵、平原、沙漠等多种地形，其中毛乌素沙漠、库布齐沙漠等沙化土地约占总面积的48%[17]。鄂尔多斯市是典型的干旱半干旱区域，以温带大陆性气候为主，降水集中于7—9月，由东向西递减，植被类型以荒漠草原、沙生植被和草甸为主[18]。作为黄河流经的第二长地级市，鄂尔多斯市承担着涵养水源保持水质的重任，显示了其在黄河流域中的重要战略地位（图1）。

2 数据与方法

2.1 数据来源及预处理

生态指标数据：16 d合成的500 m分辨率的MOD13A1植被指数产品、8 d合成的500 m分辨率



注：该图基于国家测绘地理信息局标准地图服务网站下载的审图号为GS(2019)1822号的标准地图制作，底图边界无修改。EVI为绿度指标。下同。

图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

的MOD09A1地表反射率数据和1000 m分辨率的MOD11A2地表温度产品，数据获取时间为每年的7—8月，该期间雨水充沛，植被茂盛。所用数据已经过大气校正等预处理，并在GEE云平台进行均值合成。

其他数据：高程数据来自中国科学院资源环境科学数据中心（http://www.resdc.cn），空间分辨率为500 m；降水量数据来源于时空三极环境大数据平台（http://poles.tpdc.ac.cn）的1000 m分辨率逐月数据，该数据通过Delta空间降尺度生成，并经过独立气象观测点验证，结果可信，采用求和运算获取年降水量[19]；国内生产总值（Gross domestic product，GDP）数据来源于Figshare（https://figshare.com）的全球1000 m分辨率生产总值数据，该数据已进行相关性验证[20]；人口数据是100 m分辨率的WorldPop网格数据集（https://www.worldpop.org），通过求和获得500 m分辨率数据。

以上数据时间序列为2001—2019年，采用WGS-1984坐标系，按照鄂尔多斯市边界提取，使用等面积投影法，通过插值法重采样为500 m空间分辨率数据，以便进行后续分析。

2.2 研究方法

2.2.1 生态指标 生态指标是决定RSEI的重要因素，RSEI模型使用的绿度、湿度、干度、温度4个指标，不仅与人类生存息息相关，也是最直观反应生态质量变化的指标[7]。该研究绿度指标选择适合植被旺盛期监测的增强型植被指数（Enhanced vegetation index，EVI）数据[21]；湿度指标采用适合于干旱区域的地表含水量指数（Surface water content index，SWCI）[22]；干度指标（Normalized difference built-up and soil index，NDBSI）[23]使用归一化建筑指数（Normalized difference built-up index，NDBI）[24]和裸土指数（Soil index，SI）的均值表示[7]；温度指标选取MOD11A2产品提供的热力学地表温度（Land surface temperature，LST）。为减小地表水系对绿度和湿度指标的影响[25]，利用归一化差异水体指数（Modified normalized difference water index，MNDWI）对研究区进行大范围水体掩膜处理[26-27]。SWCI、NDBSI、MNDWI等计算公式如下：

$$\mathrm{SWCI}=\frac{B_6-B_7}{B_6+B_7} \tag{1}$$

$$\mathrm{NDBSI}=\frac{\mathrm{NDBI}+\mathrm{SI}}{2} \tag{2}$$

$$\mathrm{NDBI}=\frac{B_1-B_4}{B_1+B_4} \tag{3}$$

$$\mathrm{SI}=\frac{(B_6+B_1)-(B_2+B_3)}{(B_6+B_1)+(B_2+B_3)} \tag{4}$$

$$\mathrm{MNDWI}=\frac{B_4-B_6}{B_4+B_6} \tag{5}$$

式中：B_1~B_7分别为MOD09A1的1~7波段的地表反射率数据。

2.2.2 指标整体归一化 由于构建B_RSEI的4个指标具有不同的单位和区间，需进行归一化处理。选择将研究区域在2001—2019年的数据进行遍历，筛选出可作为上下基线的最值，对指标数据进行同一标准的整体归一化，该方法保留更多数据间信息，在解决指标量纲问题的同时保留了原始数据的属性特征，适合长时间序列的研究。整体归一化公式为：

$$\mathrm{DN_a}=\frac{\mathrm{DN_b}-\mathrm{DN_{min}}}{\mathrm{DN_{max}}-\mathrm{DN_{min}}} \tag{6}$$

式中：$\mathrm{DN_a}$为第n年整体归一化数据；$\mathrm{DN_b}$为第n年原始数据；$\mathrm{DN_{min}}$、$\mathrm{DN_{max}}$分别为2001—2019年原始指标数据的最小值、最大值。

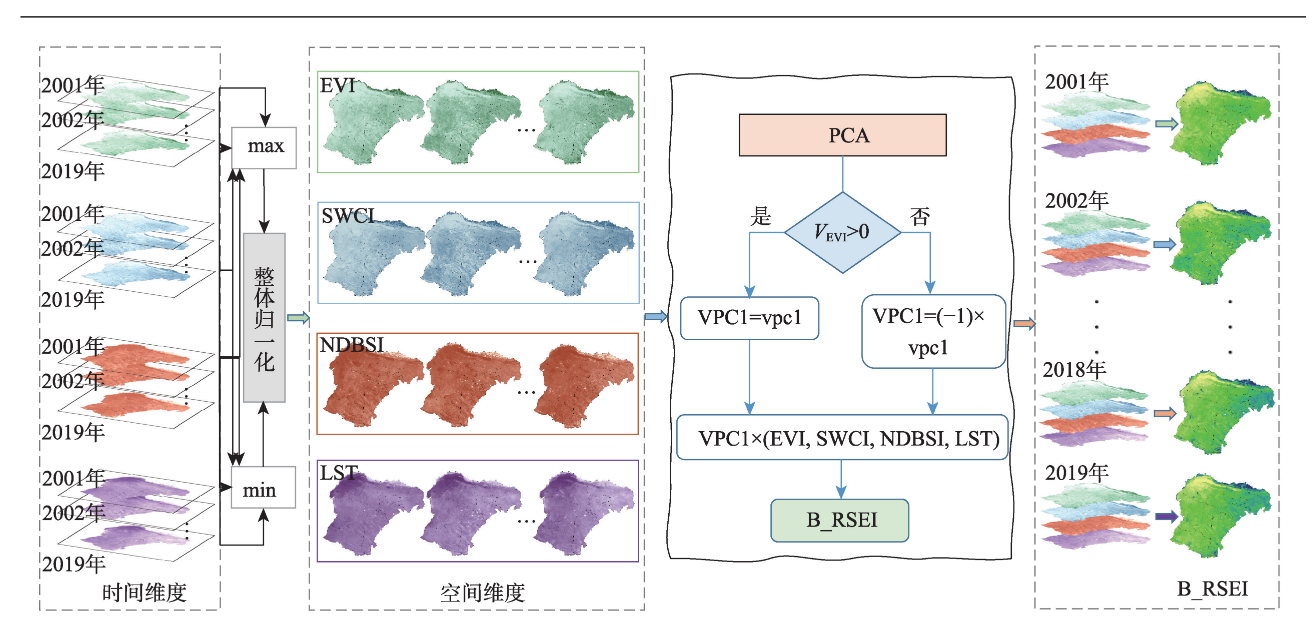
2.2.3 基线遥感生态指数的构建 B_RSEI以生态指标为依据，通过主成分分析算法构建生态模型，排除了主观因素对数据的干扰，在最大可能保留原始信息的基础上对多维数据进行建模处理，综合反映研究区域的生态质量。为准确分析研究区域的生态质量变化，将2001—2019年整体归一化的指标数据进行全局主成分分析（将数据从时间维度转为空间维度进行运算），计算出特征向量，求取每年的B_RSEI（图2）。整合过程可通过编程实现，主成分分析公式为：

$$\mathrm{B_RSEI}=\mathrm{PCA}(\mathrm{EVI},\ \mathrm{SWCI},\ \mathrm{NDBSI},\ \mathrm{LST}) \tag{7}$$

$$\begin{aligned}\mathrm{B_RSEI}=&\ \mathrm{VPC1_1}\times\mathrm{EVI}+\mathrm{VPC1_2}\times\mathrm{SWCI}+\\&\mathrm{VPC1_3}\times\mathrm{NDBSI}+\mathrm{VPC1_4}\times\mathrm{LST}\end{aligned} \tag{8}$$

式中：EVI、SWCI、NDBSI、LST分别为整体归一化后的绿度、湿度、干度、温度；$\mathrm{VPC1_1}$~$\mathrm{VPC1_4}$为第一主成分中各指标的特征向量。

主成分分析中各主成分分量互不相关，通常选择包含较多信息的主成分作为权重计算B_RSEI[7]。主成分分析的方向与数据方差有关，无法保证结果与现实状况一致，即植被覆盖度高的区域对生态质量起修复作用，在进行主成分分析时要保持EVI与



注：SWCI为湿度指标；NDBSI为干度指标；LST为温度指标；B_RSEI为基线遥感生态指数；PCA为主成分分析；V_{EVI}为第一主成分中EVI对应的特征向量；vpc1为原始的第一主成分特征向量；VPC1为修改后的第一主成分特征向量。下同。

图2　流程图

Fig. 2　Flow Chart

B_RSEI的方向一致，与徐涵秋[7]提出的"1-PC1"原理相似。公式为：

$$\mathrm{VPC1}=\begin{cases}\mathrm{vpc1}, & V_{\mathrm{EVI}}\geqslant 0\\ (-1)\times \mathrm{vpc1}, & V_{\mathrm{EVI}}<0\end{cases} \tag{9}$$

式中：V_{EVI}为第一主成分中EVI对应的特征向量；vpc1为原始的第一主成分特征向量；VPC1为修改后的第一主成分特征向量。

为更好地对多年B_RSEI进行对比分类，对原始B_RSEI进行整体归一化处理，区域B_RSEI越高，表示该地生态质量越好。公式为：

$$\mathrm{B_RSEI}=\frac{\mathrm{B_RSEI}_0-\mathrm{B_RSEI}_{min}}{\mathrm{B_RSEI}_{max}-\mathrm{B_RSEI}_{min}} \tag{10}$$

式中：B_RSEI为整体归一化后的基线遥感生态指数；$\mathrm{B_RSEI}_0$为第n年的原始基线遥感生态指数；$\mathrm{B_RSEI}_{min}$、$\mathrm{B_RSEI}_{max}$分别为多年B_RSEI的最小值、最大值。

为直观表达生态质量时空演变，参考以往研究[7-8,11-12]，在保留年际变化的基础上，基于同一分类标准，采用等间隔分类法将归一化后的B_RSEI分为优（0.8~1.0）、良（0.6~0.8）、中（0.4~0.6）、低（0.2~0.4）、差（0.0~0.2）5个等级，并分析不同年份的等级变化。

2.2.4　地理探测器　地理探测器是一组用于探测空间分异性并揭示其背后驱动机制的统计方法[28]，广泛用于数值型变量和定性数据的特征分析[4,29-30]。地理探测器中因子探测用于探测不同因子对变量（Y）空间分布的解释力，强度用q值来衡量，公式为：

$$q=1-\frac{\sum_{h=1}^{L}N_h\sigma_h^2}{N\sigma^2} \tag{11}$$

式中：h=1, 2, …, L为因子或变量（Y）的分层；N_h和N为层h内和全区域内的单元数；σ_h^2和σ^2分别为层h和全区变量（Y）的方差；q为解释力，$q\in[0, 1]$，q值越接近于1，表示因子对变量（Y）的解释力越强。

地理探测器中交互作用探测用于识别不同因子间的交互作用对因变量的影响[28]，主要是比较两因子独立作用与交互作用的关系。

2.2.5　趋势分析

（1）Theil-Sen Median趋势分析

Theil-Sen Median趋势分析是一种稳健的非参数统计的趋势计算方法，可规避时间序列数据缺失和数据分布形态的影响[31]，该方法使用斜率中位数对多年数据变化进行分析，适用于长时间序列数据的趋势分析[30]。当Sen>0.0005时，表示B_RSEI增长；Sen<0.0005时，表示B_RSEI降低，反之则稳定。

（2）Mann-Kendall检验

Mann-Kendall检验允许空值和异常值的存在，且不要求数据遵循正态分布、线性趋势等原则[31]，普遍适应于长时间序列信息趋势的显著性检测领域[13,30]。当Z的绝对值大于1.96时，表示趋势通过

了置信度为95%的显著性检验。

3 结果与分析

3.1 基线遥感生态指数影响因素分析

通过对2001—2019年生态指数进行全局建模得到各主成分(表1)。结果显示,第一主成分(PC1)的贡献率大于80%,占主要部分,说明PC1对研究数据具有较强的解释性,代表了4项生态指标中的绝大多数信息,可使用PC1的特征向量计算B_RSEI分析生态质量。

第一主成分中,代表绿度的EVI和代表湿度的SWCI特征值为正,说明其对B_RSEI起促进作用,代表干度的NDBSI和代表温度的LST特征值为负,说明其对B_RSEI起抑制作用,与实际相符。4个指标特征值的绝对值为LST>SWCI>EVI>NDBSI,说明该地区指标影响程度依次为:温度>湿度>绿度>干度,可能原因是鄂尔多斯市地处干旱半干旱区域,生态系统脆弱,对气候异常敏感[32],高温增强了潜在蒸散,降低了土壤含水量,使得湿度对B_RSEI的影响减弱[33]。EVI和SWCI特征值的绝对值之和为0.97,NDBSI、LST特征值的绝对值之和为1.01,表明EVI和SWCI对B_RSEI的促进作用小于NDBSI和LST对B_RSEI的抑制作用。

表1 指标主成分分析

Tab. 1 Principal component analysis of four factors

指标	PC1	PC2	PC3	PC4
EVI	0.47	0.40	0.44	0.65
SWCI	0.50	0.29	0.32	−0.75
NDBSI	−0.42	−0.34	0.84	−0.06
LST	−0.59	0.80	0.02	−0.07
特征值	0.0545	0.0099	0.0022	0.0013
贡献率/%	80.35	14.53	3.22	1.90

注:PC1~PC4分别为第一、二、三、四主成分;EVI为绿度指标;SWCI为湿度指标;NDBSI为干度指标;LST为温度指标。下同。

3.2 基线遥感生态指数的时空演变特征

3.2.1 B_RSEI的时间演变分析 基于2001—2019年的B_RSEI,根据等级划分结果,依次计算2001—2010年和2010—2019年的生态质量等级变化(图3),可知,2001—2019年鄂尔多斯市生态质量状况有所提升。

2001—2019年生态质量为差的等级面积在逐渐减少,少数低等生态质量转为差等,差等生态质量的改变区域多数转向低等,极少数转向中等和良等;2001—2019年生态质量为优的等级面积呈现先减少后增多,2001—2010年极少数良等生态质量和个别中等生态质量转为优等,优等生态质量的改变区域多数流向良等,少数流向中等,2010—2019年部分良等生态质量和极少数中等生态质量转为优

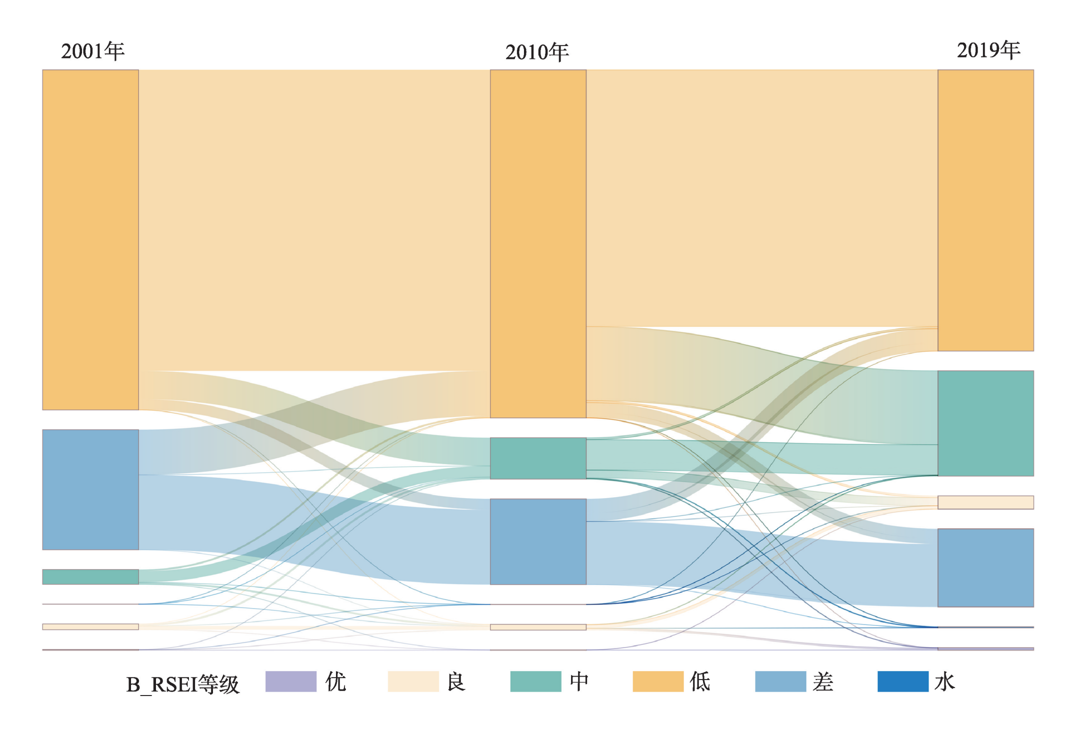


图3 生态等级变化桑基图

Fig. 3 Sankey map of ecological class change

等，优等生态质量的改变区域大多数流向良等。说明2001—2019年鄂尔多斯市生态质量整体呈上升趋势，生态质量有所改善，且2010—2019年的改善效果更加明显。

3.2.2 B_RSEI的空间演变分析 通过分析2001—2019年B_RSEI等级变化趋势（图4）可知，2001—2019年鄂尔多斯市生态质量总体处于中等偏下水平，且呈现东高西低的空间分异特征。

鄂尔多斯市生态质量差等区域多分布于西北部，该处有库布齐沙漠，生态质量提升较为困难，西部和中部地区大多是荒漠草原，植被覆盖率较低，受气候影响更为显著，生态环境脆弱；生态质量优等区域较多分布在北部约10 km的黄河冲积平原，区域水分充足，土地较为肥沃，具备良好的农业耕作条件，B_RSEI较高，东北部区域以灌丛森林为主，随着时间推移具有扩张趋势，生态质量等级由低等向中等提升，生态系统较为稳定。

由B_RSEI等级变化图分析（图4）可知，2005、2011、2015年鄂尔多斯市生态质量差等区域增加。鄂尔多斯市具有大面积的草原生态系统[34]，生态质量变化与植被生长具有一致性，而降水和温度对植被的生长状况和空间分布具有直接和间接影响[33]。其次，组成B_RSEI的生态指标与降水有密切关系，降水增多会增加绿度和湿度降低干度，调节温度。通过整体归一化的降水量和温度对3 a生态质量进行分析（图5）可知，相较于2001年，2005年生态质量呈现西部退化东北部改善的空间分布现象，该年东北部降水量增加，温度降低，西部与之相反；2011年生态质量在西北部恶化东部改善，该年西北方向降水量减少，温度升高，东部降水集中，温度有明显下降；2015年生态质量在西部呈现恶化趋势，该年西部降水量减少，出现大面积高温区域。将2001—2019年降水量、温度与B_RSEI分别整体归一化，并绘制点线图和散点图（图5i~k）。结果显示，降水量与B_RSEI呈现正相关，相关系数为0.80，降水量在2005、2011、2015年普遍较低；温度与B_RSEI呈现

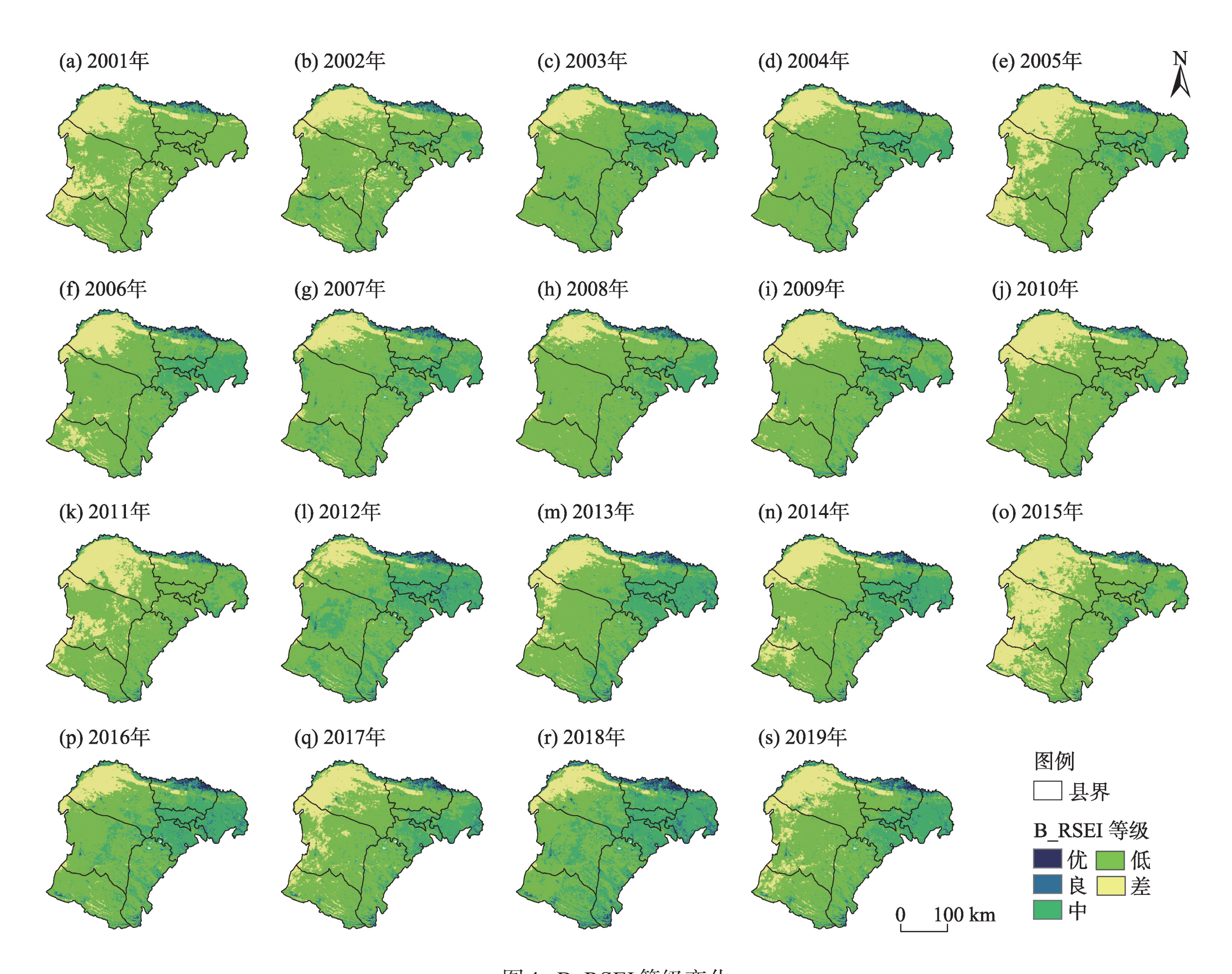


图4　B_RSEI等级变化

Fig. 4　Grade change of B_RSEI

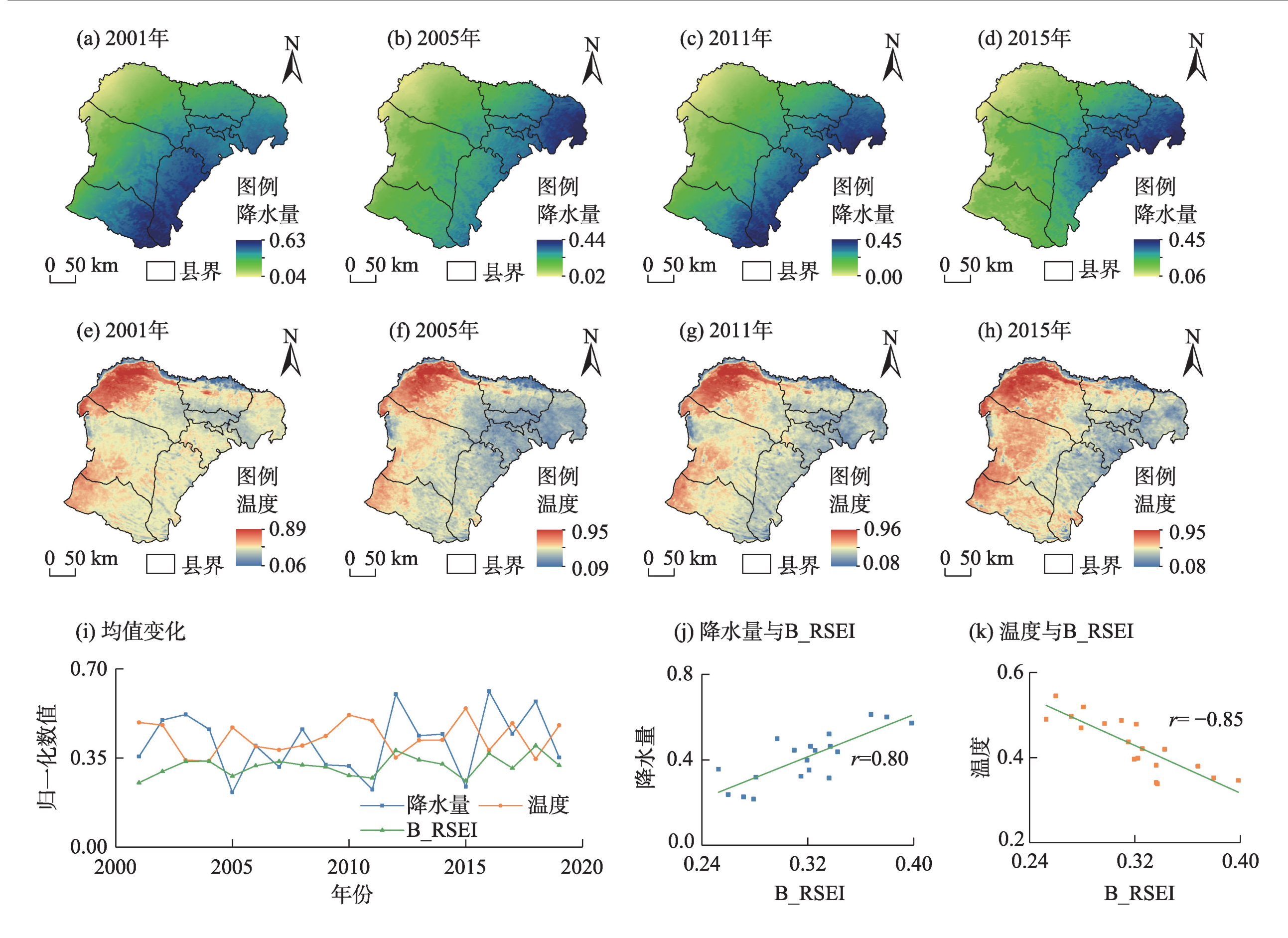


图5 降水量与温度变化

Fig. 5 Changes of precipitation and temperature

正相关，相关系数为-0.85，温度在2005、2011、2015年普遍较高，表明温度的上升和降水量的减少是导致B_RSEI降低的原因。

3.3 B_RSEI空间分布驱动分析

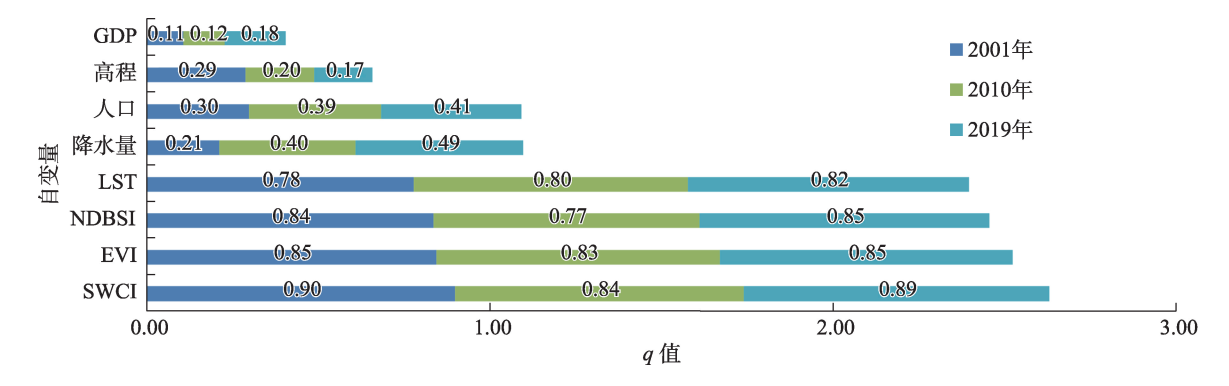
为探究鄂尔多斯市生态质量在空间分异性的影响因素，考虑自然因素和人为因素的共同影响，选取SWCI、EVI、NDBSI、LST、降水量、人口、高程、CDP共8个因子作为自变量，以B_RSEI作为因变量，利用地理探测器分别进行因子探测分析和交互作用探测分析（图6、表2）。

因子探测分析结果显示，2001—2019年各因子对B_RSEI的解释力存在差异，但总体上相似，4个生态指标对B_RSEI的影响力较大，GDP和高程对B_RSEI的影响力相对较低。2001、2010、2019年湿度的q值最大，表明湿度是影响B_RSEI空间分布的重要因素；降水量的解释力呈现显著增长趋势，表明降水量对B_RSEI空间分布的影响逐渐增加，符合干旱区半干旱的特征[32]。通过解释力分析对比可知，自然因素对B_RSEI的影响力大于人为因素，表明人类活动是影响鄂尔多斯市生态质量空间分布的间接因素。

交互探测器分析结果显示，除2001年降水量与高程、GDP、人口的交互作用呈现非线性增强，其余均为双因子增强，不存在起独立作用的因子。单因子指标在与其他因子交互后解释力增强，表明双因子交互对鄂尔多斯市生态质量空间分布的影响不低于单一因子。其中，EVI∩LST与SWCI∩LST交互作用解释力较高，其次是NDBSI∩LST，LST与其他探测因子交互作用的结果进一步表明温度较大程度影响了该区域的生态质量。

3.4 B_RSEI的变化趋势分析

结合Theil-Sen Median趋势分析和Mann-Kendall检验将生态质量变化趋势划分为明显改善、轻微改善、稳定不变、轻微退化、严重退化5个等级，对2001—2019年鄂尔多斯市的B_RSEI变化趋势进行分析（图7）。结果表明，2001—2019年鄂尔多斯市B_RSEI整体呈现明显的提升，B_RSEI改善的区域占总面积的67.13%，B_RSEI稳定不变的区域



注：q为解释力强度。

图6 2001—2019年各因子对B_RSEI的解释力强度

Fig. 6 Explanatory power of each factor to B_RSEI from 2001 to 2019

表2 2001—2019年交互探测器分析结果

Tab. 2 Analysis results of interactive detectors from 2001 to 2019

交互因子	2001年	2010年	2019年	交互因子	2001年	2010年	2019年
SWCI∩EVI	0.94	0.89	0.93	NDBSI∩降水量	0.90	0.88	0.92
SWCI∩NDBSI	0.94	0.90	0.94	NDBSI∩人口	0.87	0.82	0.87
SWCI∩LST	0.97	0.97	0.97	NDBSI∩高程	0.88	0.87	0.88
SWCI∩降水量	0.94	0.93	0.94	NDBSI∩GDP	0.85	0.78	0.85
SWCI∩人口	0.91	0.88	0.91	LST∩降水量	0.82	0.82	0.84
SWCI∩高程	0.93	0.88	0.91	LST∩人口	0.80	0.82	0.83
SWCI∩GDP	0.90	0.85	0.90	LST∩高程	0.81	0.83	0.84
EVI∩NDBSI	0.92	0.92	0.92	LST∩GDP	0.79	0.81	0.83
EVI∩LST	0.97	0.97	0.98	降水量∩人口	0.52**	0.58	0.62
EVI∩降水量	0.88	0.89	0.91	降水量∩高程	0.54**	0.60	0.63
EVI∩人口	0.87	0.87	0.89	降水量∩GDP	0.34**	0.46	0.52
EVI∩高程	0.88	0.86	0.88	人口∩高程	0.52	0.53	0.51
EVI∩GDP	0.86	0.85	0.88	人口∩GDP	0.34	0.41	0.44
NDBSI∩LST	0.96	0.94	0.96	高程∩GDP	0.37	0.31	0.30

注：GDP为国内生产总值；**表示非双线性增强。

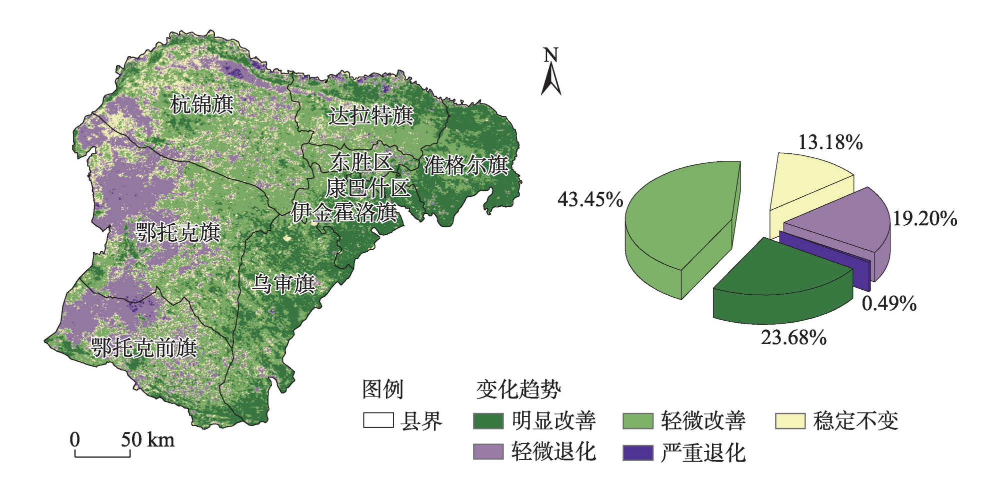


图7 2001—2019年B_RSEI变化趋势

Fig. 7 Trend of B_RSEI chart from 2001 to 2019

占总面积的13.18%，B_RSEI退化区域占总面积的19.69%，严重退化区域仅占0.49%。19 a来鄂尔多斯市生态改善区域远大于退化区域，说明鄂尔多斯市生态质量在逐步改善，且改善效果明显。

B_RSEI退化区域聚集在鄂尔多斯市西南部，以鄂托克旗和鄂托克前旗为主，该区域是典型的半荒漠草原区，野生植物分布广泛，由于散养游牧、开荒等传统生产方式的不科学规划，出现过度放牧、滥垦乱伐等现象，是该区生态质量退化的重要原因[35]，少量退化区域分布在杭景旗的沙漠腹部，该区域受自然因素影响较大，人为治理困难，沙漠边缘受“引黄入沙”影响，具备动植物的繁衍生存条件，至2020年库布齐沙漠已有近百平方公里的生态湿地[36]，在一定程度上改善了生态质量。

B_RSEI明显改善区域集中在鄂尔多斯市东部，该区域以山地草甸为主，植被覆盖度高，生态系统结构稳定，抗干扰能力较强，其中，乌审旗生态质量的提升说明了毛乌素沙漠治理取得的积极成效；准格尔旗与伊金霍洛旗地势较高，区域内存储着丰富的能源矿产，井工矿点和露天矿点分布广泛，政府通过调整资源开发项目探索绿色矿山的发展，关闭不合理的露天矿场，及时对开发沉陷区进行绿化修复，实现土地再利用，提升作业环境，该区域生态质量呈现明显改善趋势，说明矿区生态环境治理方面取得的优异成果，为鄂尔多斯市生态质量的改善做出了积极贡献[31]。另一方面，退耕还林工程启动后，当地牧民将粮食产量低的陡坡耕地和沙化耕地进行规划，建立沙地保护区，在林间空隙种植牧草，发展多种经营，落实禁牧轮牧、退牧还草等措施，提高植被覆盖率[17,33]。

3.5 基线遥感生态指数的适用性

B_RSEI模型仍采用主成分分析方法，基于同一坐标的思想对整体归一化数据进行一次全局建模（图8），从图可知，全局建模和逐年建模在每年的分布趋势上相对一致，前者在长时序的分布中更为稳定。B_RSEI模型将时间和空间维度的指标数据置于同一坐标系中，获取特征向量计算B_RSEI，保留了主成分分析的优点，在一定程度上消除了主成分分析坐标的不确定性，维持了整体归一化后多年数据间的连续性，使得长时序遥感生态指数具有一定的对比性和参考性。该文将时间维度上的鄂尔多斯市数据转变为空间数据进行计算，通过主成分分析进行全局建模，进而求取每年的B_RSEI，充分展现了B_RSEI在时间维度上的演变。

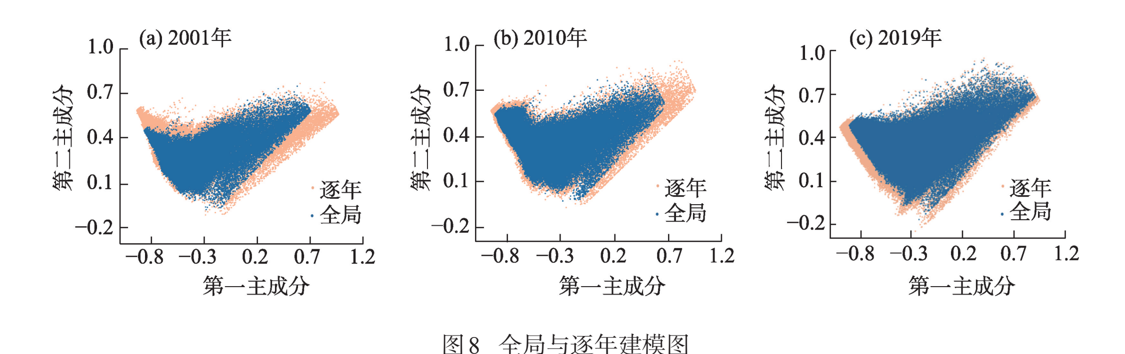


图8 全局与逐年建模图

Fig. 8 Comparison diagram of global modeling and year-by-year modeling

4 结论

鄂尔多斯市地处干旱半干旱区域，拥有大面积的沙漠和草原，随着国家退耕还林、三北防护林等政策的实施，鄂尔多斯市的植被覆盖率得到大幅度提升。该文利用MODIS数据，通过最值确定基线，利用主成分分析进行全局建模获取B_RSEI，对2001—2019年内蒙古自治区鄂尔多斯市生态质量的时空变化进行研究分析，得到如下结论：

（1）与RSEI相比，B_RSEI具有稳定的方向性，能更好地反映生态质量长时序变化。时空分析表现为2001—2019年鄂尔多斯市B_RSEI呈现起伏增长，生态质量得到提升，且呈现东高西低的空间分异性。

（2）B_RSEI结果表明：SWCI是对B_RSEI起促进作用的主要因素，LST是对B_RSEI起抑制作用的主要因素。利用地理探测器对B_RSEI各因子的分析表明，SWCI是影响B_RSEI空间分布的主要单因子，LST与其他探测因子交互作用最大。

（3）鄂尔多斯生态质量以改善为主，占总面积的67.13%，准格尔旗、康巴什区、伊金霍洛旗地区生态治理效果显著，杭锦旗、鄂托克旗地区整体生态质量最差，鄂托克前旗生态质量稳定性较弱，需要加强该地的生态管理。

参考文献（References）

[1] 张春桂, 李计英. 基于3S技术的区域生态环境质量监测研究[J]. 自然资源学报, 2010, 25(12): 2060-2071. [Zhang Chungui, Li Jiying. Study of regional eco-environmental quality monitoring based on 3S techniques[J]. Journal of Natural Resources, 2010, 25(12): 2060-2071.]

[2] Xu C, Dong X P, Fang X T, et al. Cloud-based storage and computing for remote sensing big data: A technical review[J]. International Journal of Digital Earth, 2022, 15(1): 1417-1445.

[3] Noel G, Matt H, Mike D, et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone[J]. Remote Sensing of Environment, 2017, 202: 18-27.

[4] Shi S H, Wang X L, Hu Z X, et al. Geographic detector-based quantitative assessment enhances attribution analysis of climate and topography factors to vegetation variation for spatial heterogeneity and coupling[J]. Global Ecology and Conservation, 2023, 42: E02398, doi: 10.1016/J.GECCO.2023.E02398.

[5] Yang Y P, Yang D, Wang X F, et al. Testing accuracy of land cover classification algorithms in the Qilian Mountains based on GEE cloud platform[J]. Remote Sensing, 2021, 13(24): 5064, doi: 10.3390/RS13245064.

[6] 王小娜, 田金炎, 李小娟, 等. Google Earth Engine云平台对遥感发展的改变[J]. 遥感学报, 2022, 26(2): 299-309. [Wang Xiaona, Tian Jinyan, Li Xiaojuan, et al. Benefits of Google Earth Engine in remote sensing[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2022, 26(2): 299-309.]

[7] 徐涵秋. 城市遥感生态指数的创建及其应用[J]. 生态学报, 2013, 33(24): 7853-7862. [Xu Hanqiu. A remote sensing urban ecological index and its application[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(24): 7853-7862.]

[8] Geng J W, Yu K Y, Xie Z, et al. Analysis of spatiotemporal variation and drivers of ecological quality in Fuzhou based on RSEI[J]. Remote Sensing, 2022, 14(19): 4900, doi: 10.3390/RS14194900.

[9] Yuan B D, Fu L N, Zou Y A, et al. Spatiotemporal change detection of ecological quality and the associated affecting factors in Dongting Lake Basin, based on RSEI[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 302: 126995, doi: 10.1016/J.JCLEPRO.2021.126995.

[10] 王瑾杰, 丁建丽, 张子鹏. 基于遥感生态指数的吐哈地区生态环境变化研究[J]. 干旱区地理, 2022, 45(5): 1591-1603. [Wang Jinjie, Ding Jianli, Zhang Zipeng. Change of ecological environment in Turpan and Hami cities based on remote sensing ecology index [J]. Arid Land Geography, 2022, 45(5): 1591-1603.]

[11] 宋美杰, 罗艳云, 段利民. 基于改进遥感生态指数模型的锡林郭勒草原生态环境评价[J]. 干旱区研究, 2019, 36(6): 1521-1527. [Song Meijie, Luo Yanyun, Duan Limin. Evalution of ecological environment in the Xilin Gol Steppe based on modified remote sensing ecological index model[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(6): 1521-1527.]

[12] 罗镕基, 王宏涛, 王成. 基于改进遥感生态指数的甘肃省古浪县生态质量评价[J]. 干旱区地理, 2023, 46(4): 539-549. [Luo Rongji, Wang Hongtao, Wang Cheng. Ecological quality evaluation of Gulang County in Gansu Province based on improved remote sensing ecological index[J]. Arid Land Geography, 2023, 46(4): 539-549.]

[13] Zheng Z H, Wu Z F, Chen Y B, et al. Instability of remote sensing based ecological index (RSEI) and its improvement for time series analysis[J]. Science of the Total Environment, 2022, 814: 152595, doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2021.152595.

[14] Zhu D Y, Chen T, Zhen N, et al. Monitoring the effects of open-pit mining on the eco-environment using a moving window-based remote sensing ecological index[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2020, 27(13): 15716-15728.

[15] Cong W W, Li X Y, Pan X B, et al. A new scientific framework of dryland ecological quality assessment based on 1OAO principle[J]. Ecological Indicators, 2022, 136: 108595, doi: 10.1016/J.ECOLIND.2022.108595.

[16] Wang J B, Ding Y F, Wang S Q, et al. Pixel-scale historical-baseline-based ecological quality: Measuring impacts from climate change and human activities from 2000 to 2018 in China[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 313: 114944, doi: 10.1016/J.JENVMAN.2022.114944.

[17] 马苏, 刘军会, 康玉麟, 等. 鄂尔多斯市防风固沙功能时空变化及驱动因素分析[J]. 环境科学研究, 2022, 35(11): 2477-2485. [Ma Su, Liu Junhui, Kang Yulin, et al. Spatio-temporal changes of sand-fixing function and its driving factors in the Ordos[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(11): 2477-2485.]

[18] 黄金廷, 侯光才, 陶正平, 等. 鄂尔多斯高原植被生态分区及其水文地质意义[J]. 地质通报, 2008(8): 1330-1334. [Huang Jinting, Hou Guangcai, Tao Zhengping, et al. Vegetation ecological areas of the Ordos Plateau, China and their hydrogeological significance[J]. Geological Bulletin of China, 2008(8): 1330-1334.]

[19] Peng S Z, Ding Y X, Wen Z M, et al. Spatiotemporal change and trend analysis of potential evapotranspiration over the Loess Plateau of China during 2011—2100[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 233: 183-194.

[20] Chen J D, Gao M, Cheng S L, et al. Global 1 km×1 km gridded revised real gross domestic product and electricity consumption during 1992—2019 based on calibrated nighttime light data[J]. Scientific Data, 2022, 9(1): 202, doi: 10.1038/s41597-022-01322-5.

[21] 谌稳, 孙立群, 李晴岚, 等. 一种基于图论重构MODIS EVI时间序列数据集的新方法[J]. 地球信息科学学报, 2022, 24(4): 738-

749. [Chen Wen, Sun Liqun, Li Qinglan, et al. A new method to reconstruct MODIS EVI time series data set based on graph theory [J]. Journal of Geo-information Science, 2022, 24(4): 738-749.]

[22] 张红卫, 陈怀亮, 申双和, 等. 基于表层水分含量指数(SWCI)的土壤干旱遥感监测[J]. 遥感技术与应用, 2008, 23(6): 624-628, 600. [Zhang Hongwei, Chen Huailiang, Shen Shuanghe, et al. Drought remote sensing monitoring based on the surface water content index (SWCI) method[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2008, 23(6): 624-628, 600.]

[23] 左璐, 孙雷刚, 鲁军景, 等. 基于MODIS的京津冀地区生态质量综合评价及其时空变化监测[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(2): 203-214. [Zuo Lu, Sun Leigang, Lu Junjing, et al. MODIS-based comprehensive assessment and spatial-temporal change monitoring of ecological quality in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Remote Sensing of Natural Resources, 2022, 34(2): 203-214.]

[24] 吕颖, 刘慧平, 刘锦绣. 基于中分辨率成像光谱仪数据的建筑指数研究[J]. 测绘科学, 2015, 40(5): 44-48, 70. [Lü Ying, Liu Huiping, Liu Jinxiu. Study on build-up index based on MODIS data[J]. Science of Surveying and Mapping, 2015, 40(5): 44-48, 70.]

[25] Jia H, Yan C, Xing X. Evaluation of eco-environmental quality in Qaidam Basin based on the ecological index (MRSEI) and GEE[J]. Remote Sensing, 2021, 13(22): 4543, doi: 10.3390/RS13224543.

[26] Tellman B, Sullivan J A, Kuhn C, et al. Satellite imaging reveals increased proportion of population exposed to floods[J]. Nature, 2021, 596(7870): 80-86.

[27] 徐涵秋. 利用改进的归一化差异水体指数(MNDWI)提取水体信息的研究[J]. 遥感学报, 2005, 9(5): 589-595. [Xu Hanqiu. A study on information extraction of water body with the modified normalized difference water index (MNDWI)[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2005, 9(5): 589-595.]

[28] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134. [Wang Jinfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(1): 116-134.]

[29] Zhang M, Kafy A, Ren B, et al. Application of the optimal parameter geographic detector model in the identification of influencing factors of ecological quality in Guangzhou, China[J]. Land, 2022, 11(8): 1303, doi: 10.3390/LAND11081303.

[30] 贺军奇, 魏燕, 高万德, 等. 毛乌素沙地东南缘植被NDVI时空变化及其对气候因子的响应[J]. 干旱区地理, 2022, 45(5): 1523-1533. [He Junqi, Wei Yan, Gao Wande, et al. Temporal and spatial variation of vegetation NDVI and its response to climate factors in the southeastern margin of Mu Us Sandy Land[J]. Arid Land Geography, 2022, 45(5): 1523-1533.]

[31] 吴秦豫, 姚喜军, 梁洁, 等. 鄂尔多斯市煤矿区植被覆盖改善和退化效应的时空强度[J]. 干旱区资源与环境, 2022, 36(8): 101-109. [Wu Qinyu, Yao Xijun, Liang Jie, et al. Spatial and temporal intensity of vegetation cover improvement and degradation in coal mining areas of Erdos City[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2022, 36(8): 101-109.]

[32] 吕妍, 王让会, 蔡子颖. 我国干旱半干旱地区气候变化及其影响[J]. 干旱区资源与环境, 2009, 23(11): 65-71. [Lü Yan, Wang Ranghui, Cai Ziying. Climatic change and influence in arid and semi-arid area of China[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2009, 23(11): 65-71.]

[33] Li J Y. Responses of vegetation NDVI to climate change and land use in Ordos City, north China[J]. Applied Sciences, 2022, 12(14): 7288, doi: 10.3390/APP12147288.

[34] 董天, 肖洋, 张路, 等. 鄂尔多斯市生态系统格局和质量变化及驱动力[J]. 生态学报, 2019, 39(2): 660-671. [Dong Tian, Xiao Yang, Zhang Lu, et al. Analysis of driving factors that influence the pattern and quality of the ecosystem in Ordos[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(2): 660-671.]

[35] 马格. 鄂尔多斯市土地利用/覆被及植被覆盖度变化研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2020. [Ma Ge. Study on change of land use/cover and vegetation coverage in Ordos City[D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2020.]

[36] 赵燕, 荆慧敏, 刘基智. 鄂尔多斯市黄河流域生态保护和高质量发展初步研究[J]. 北方经济, 2022(1): 60-64. [Zhao Yan, Jing Huimin, Liu Jizhi. Preliminary study on ecological protection and high quality development of the Yellow River Basin in Ordos City [J]. Northern Economy, 2022(1): 60-64.]

Ecological quality analysis of Ordos City based on the baseline remote sensing ecological index

XUE Huazhu[1], YUAN Qian[1], DONG Guotao[1,2,3], YAO Nan[1], ZHANG Qing[1]

(1. School of Surveying, Mapping and Land Information Engineering, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, Henan, China;
2. Heihe Water Resources and Ecological Protection Research Center, Lanzhou 730030, Gansu, China; 3. Yellow River Conservancy Research Institute, Yellow River Conservancy Commission, Zhengzhou 450003, Henan, China)

Abstract: Ordos City is an important steppe desert and agropastoral ecotone in the Yellow River Basin, China. Studying the changes in ecological quality in Ordos City is important for supporting the ecological conservation and high-quality development of the Yellow River Basin. Herein, the remote sensing imagery of a moderate-resolution imaging spectroradiometer was used as a data source to calculate the baseline remote sensing ecological index (B_RSEI) of Ordos City by improving the conventional normalization and principal component analysis. This study also analyzes the characteristics of ecological quality changes from 2001 to 2019. The results indicate the following: (1) B_RSEI exhibits stable directionality and integrity, offering an enhanced reflection of long-term changes in ecological quality. From 2001 to 2019, B_RSEI of Ordos City showed a fluctuating increase and a spatial differentiation of higher in the east and lower in the west. (2) The surface water content index (SWCI) is the primary factor promoting B_RSEI and serves as the main factor explaining the B_RSEI distribution. The land surface temperature (LST) is the main factor inhibiting B_RSEI, with its most substantial interaction. (3) The ecological quality of Ordos City has improved, covering 67.13% of the total area, with notable ecological management effects in the Jungar Banner, Kangbashen District, and Ejin Horo Banner areas. This study demonstrates an overall improvement in the ecological quality of Ordos City, emphasizing the usefulness of B_RSEI in analyzing interannual changes. This could provide a reference for the ecological governance of the Ordos City and high-quality development of the Yellow River Basin.

Key words: ecological quality; B_RSEI; principal component analysis; Ordos City